ISSN 1024-588X. Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2018. Випуск 55. С. 24-39
Visnyk of the Lviv University. Series Physics. 2018. Issue 55. P. 24-39

УДК 524.37
PACS 98.58.Li
DOI: https://doi.org/10.30970/vph.55.2018.24

Перевірка надійності визначення хімічного вмісту планетарних туманностей діагностичним методом у поєднанні з популярними виразами для іонізаційно-корекційних множників

Б. Мелех, О. Хмілевська, М. Кашеба

Львівський Національний університет імені Івана Франка,
кафедра астрофізики,
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005, Львів, Україна,
e-mail: bmelekh@gmail.com

Здійснено перевірку коректності визначення хімічного вмісту в оболонках планетарних туманностей (ПТ) за допомогою вибірки популярних виразів у поєднанні з діагностичними методами визначення іонного вмісту на основі діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній в спектрах цих об'єктів. Коректність виразів перевірялася на основі спектрів сучасної сітки фотоіонізаційних моделей світіння ПТ, розрахованої вздовж еволюційних треків їхніх ядер, з реалістичним описом радіального розподілу густини речовини в небулярній оболонці. Було взято до уваги також наявність силікатного або карбонатного пилу в оболонці ПТ. Синтетичні емісійні лінійчасті спектри ПТ значно багатші від спостережуваних. У даній праці продіагностовано спектри і отриманий в результаті іонний вміст використано для визначення хімічного вмісту елементів за допомогою вибірки популярних виразів, запропонованих різними авторами. Отриманий у такий спосіб хімічний вміст порівнювали із заданим під час розрахунку сітки фотоіонізаційних моделей світіння. Продемонстровано необхідність виведення нових виразів для визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ за результатами розрахунку цієї сітки моделей.

Ключові слова: Планетарні туманності, пил, фотоіонізаційне моделювання, хімічний вміст

1 Вступ

Планетарні туманності (ПТ) є зручними об'єктами для вивчення хімічної еволюції речовини у нашій Галактиці [1], а також у Магеланових Хмарах. Порівняно проста структура оболонок ПТ дає змогу досить точно [2, 3] визначати їх хімічний

склад. Порівнюючи металічності ПТ та інших небулярних середовищ, маємо можливість отримати точнішу інформацію про вміст догалактичного гелію, а також темпу його збагачення в процесі зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті. Так, надзвичайно важливим для вивчення зоряного нуклеосинтезу, а також історії зореутворення в Галактиці є точне визначення вмісту хімічних елементів в оболонках ПТ. Але часто трапляється так, що результати такого визначення є неоднозначними, або ж суперечать одне одному. Однією з причин таких неточностей є некоректне врахування неспостережуваних стадій іонізації під час визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ. Проблемою визначення повного хімічного вмісту певного елемента в небулярних середовищах (до яких належать і оболонки ПТ) є те, що лінії не всіх його іонів є у спостережуваних спектрах.

Для визначення повного вмісту хімічних елементів на основі іонного вмісту необхідно взяти до уваги неспостережувані стадії іонізації (вміст іонів, який неможливо визначити шляхом діагностики небулярного спектра). Загалом, є два шляхи такого врахування: перший базується на близькості потенціалів іонізації деяких іонів, а другий – на результатах фотоіонізаційного моделювання світіння небулярних середовищ, які розглядаються. Перший шлях не враховує різниць в ефективних перерізах фотоіонізації іонів з близькими стадіями іонізації, а другий потребує використання відповідних спостережуваним даним фотоіонізаційних моделей. Так, другий шлях більш коректний.

Метою праці є перевірка коректності застосування діагностичних підходів, а також вибірки виразів для визначення хімічного вмісту в оболонках планетарних туманностей для визначення хімічного вмісту в них. Коректність виразів перевіряли на основі результатів розрахунку сучасної сітки фотоіонізаційних моделей світіння даних об'єктів, розрахованих вздовж еволюційних треків їхніх ядер, з реалістичним описом радіального розподілу густини речовини в небулярній оболонці, а також з урахуванням наявності пилу в них. Фотоіонізаційне моделювання дало змогу нам отримати значно багатші інтенсивностями емісійних ліній спектри, ніж спостережувані. У цій роботі здійснено діагностику цих спектрів і результуючий іонний вміст використано для визначення хімічного вмісту елементів. Отриманий у такий спосіб хімічний вміст порівнювався із заданим під час розрахунку сітки фотоіонізаційних моделей світіння. Результат такого порівняння характеризує правильність (або неправильність) використання відповідного виразу для визначення хімічного вмісту в оболонці ПТ.

2 Вибірка виразів для визначення хімічного вмісту в оболонках планетарних туманностей

Для визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ найчастіше використовують діагностику їх спектрів. Один з методів діагностики (DIAGN) описаний у працях [2,4]. Метою діагностики небулярних спектрів є визначення n_e та T_e у відповідних зонах іонізації на основі діагностичних співвідношень між спостережуваними інтенсивностями емісійних ліній. Значення цих параметрів дозволяє, за наявності у спостережуваному спектрі інтенсивностей відповідних ліній, визначити іонний вміст відповідного хімічного елемента.

На пост-діагностичному етапі для визначення хімічного вмісту використовуються вирази, які є функціями спостережуваного іонного вмісту (визначеного діагностичним методом) та враховують неспостережувані значення, або ж базуються на певних припущеннях, що дають змогу спростити визначення вмісту хімічних елементів.

У табл. 1 наведено вибірку популярних виразів, які часто використовуються для визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ та інших небулярних середовищах. У цій таблиці наведено також посилання на відповідні роботи, де ці вирази були запропоновані. Ознайомимося з ними детальніше.

Вираз FN1 (FN–Formula Number) базується на припущеннях, що в небулярній оболонці ПТ відсутній нейтральний гелій, а весь гелій пербуває в одно та двічі іонізованому стані, гідроґен, при цьому, вважається повністю іонізованим за всім об'ємом небулярного середовища. Перші використання цих припущень та формули FN1 можна відшукати у працях [5, 6].

На аналогічному припущенні, але стосовно інших елементів, спираються вирази FN5 (оксиґен в оболонках ПТ існує лише в одно та двічі іонізованому станах) та FN11 (неон в оболонках ПТ існує лише у двічі та тричі іонізованому станах).

Вираз FN2 містить повноцінну іонізаційно-корекційну складову, яка пов'язує вміст гелію та гідроґену в атомарному стані з часткою окиґену у першій стадії іонізації.

Вираз FN3 базується на припущенні, що нітроґен перебував в одно та двічі іонізованому стані, гідроґен повністю іонізований, а гелій – тільки в першій стадії іонізації.

Вираз FN4 пов'язує вмісти нітроґену та оксиґену через відношення їх вмістів у першій стадії іонізації. Він базується на припущенні, що в умовах небулярного середовища ПТ всі інші іонні вмісти не мають впливу на співвідношення між вмістами цих елементів.

Аналогічно у виразі FN10, вміст неону та оксиґену пов'язані через відношення їх іонного вмісту у другій стадії іонізації.

У виразі FN6 маємо зворотню до виразу FN4 ситуацію: вміст оксиґену в атомарному стані, а також у стадіях іонізації, починаючи з третьої, залежить від вмісту гелію у першій та другій стадіях іонізації.

Вирази FN7–FN9 та FN12–FN17 містять у собі складні іонізаційно-корекційні співвідношення, отримані, головно в модельний спосіб.

Так, перевіряючи кожен з цих виразів на відтворення хімічного вмісту, заданого в моделях, ми не просто даватимемо рекомендацію на використання чи невикористання кожного з цих виразів для визначення хімічного складу оболонок ПТ, а й оцінюватимемо припущення, що лягли в основу їх виведення, та перевірятимемо коректність моделей, які використано для виведення тих з виразів, у яких беруть до уваги неспостережувані стадії іонізації.

У працях [4, 17, 18], з метою врахування, під час виведення виразів для визначення хімічного вмісту неспостережуваних стадій іонізації використовувався розрахунок сітки газових фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ. Але наявність пилових зерен різних сортів може впливати на результат фотоіонізаційного моделювання світіння (ФМС) оболонки ПТ. Тому постає завдання оцінення впливу наявності пилових зерен в оболонці ПТ на результат її ФМС. Також більшість сіток моделей

Табл. 1: Вибірка виразів для визначення хімічного вмісту, які перевіряються на коректність їх застосування у випадку ПТ Галактики та Великої Магелланової Хмари

Номер виразу	Література	Вираз
FN1	[5, 6]	$He/H = [He^{+} + He^{++}]/H^{+}$
FN2	[7–10]	$He/H = (He^{+}/H^{+})[1 - 0,25\ (O^{+}/O)]^{-1}$
FN3	[11]	$N/He = [(N^{+} + N^{++})/H^{+}]/He^{+}$
FN4	[13]	$N/O = N^{+}/O^{+}$
FN5	[14]	$O/H = (O^{+} + O^{++})/H^{+}$
FN6	[6]	$O/H = (1 + He^{++}/He^{+})(O^{+} + O^{++})/H^{+}$
FN7	[12]	$O/H = [1/[1 - 0,95N^{4+}/(N^{+} + N^{++} + N^{3+} + N^{4+})]] \times (O^{+} + O^{++} + O^{3+})/H^{+}$
FN8	[12]	$O/H = [(He^{+} + He^{++})/He^{+}]^{2/3}(O^{+} + O^{++})/H^{+}$
FN9	[7, 9, 10]	$Ne/H = (Ne^{++}/H^{+})[1,2\ O^{++}/(O^{+} + O^{++}) - 0,2]^{-1}$
FN10	[13]	$Ne/O = Ne^{++}/O^{++}$
FN11	[13]	$Ne/H = (Ne^{++} + Ne^{3+})/H^{+}$
FN12	[6]	$Ne/H = (O/O^{++})(Ne^{++}/H^{+})$
FN13	[16]	$S/H = [(S^{+} + S^{++})/H^{+}][(O^{+} + O^{++})/O^{+}]$
FN14	[6]	$S/H = (O/O^{+})(S^{+} + S^{++})/H^{+}$
FN15	[12]	$S^{++}/S^{+} = 4,677 + (O^{++}/O^{+})^{0,433}$
FN16	[15]	$S/H = [S/(S^{+} + S^{++})](S^{+3}/H^{+}) =$ $= [0,013 + x(5,10 + x[-12,78 + x(14,77 - 6,11x)])]^{-1} \times (S^{+3}/H^{+})$, де $x = O^{+}/O$
FN17	[6, 8]	$N/H = (O/O^{+})(N^{+}/H^{+})$

розраховувалися для діапазонів значень вхідних параметрів ФМС, характерних для ПТ. Однак, ядро ПТ з часом переміщається вздовж свого еволюційного треку (змінюється його світність та температура), а оболонка ПТ розширюється (змінюється розподіл густини). Тому постала задача розрахунку еволюційного ФМС оболонки ПТ.

3 Моделювання світіння оболонок планетарних туманностей

Завдяки ФМС оболонок ПТ ми можемо отримати синтетичний інтегральний емісійний лінійчатий спектр цих об'єктів. Цей спектр значно багатший за спостережуваний, оскільки він не обмежений ані рамками діапазону (у моделі розраховуються лінії та континуум від радіо- до гамма-даіапазону), ані малістю інтенсивності та роздільної здатності (сучасні моделі розраховують спектр із значно більшою спектральною роздільною здатністю, а розрахунок малої інтенсивності обмежений лише розрядністю комп'ютера).

Однак, моделі мають відповідати даним спектральних спостережень оболонок реальних ПТ. Ключовими тут є порівняння модельних результатів з даними спостережень цих об'єктів в ІЧ-діапазоні, оскільки пил поглинає та розсіює випроміню-

вання як в емісійних лініях, так і в неперервному спектрі оптичного та близького УФ-діапазонів, у яких здійснюється більшість спектральних спостережень оболонок ПТ. Нагріваючись, за рахунок такого поглинання, пилинки перевипромінюють поглинуту енергію в ІЧ-діапазоні. Так пил найбільше впливає на ІЧ-спектр [19].

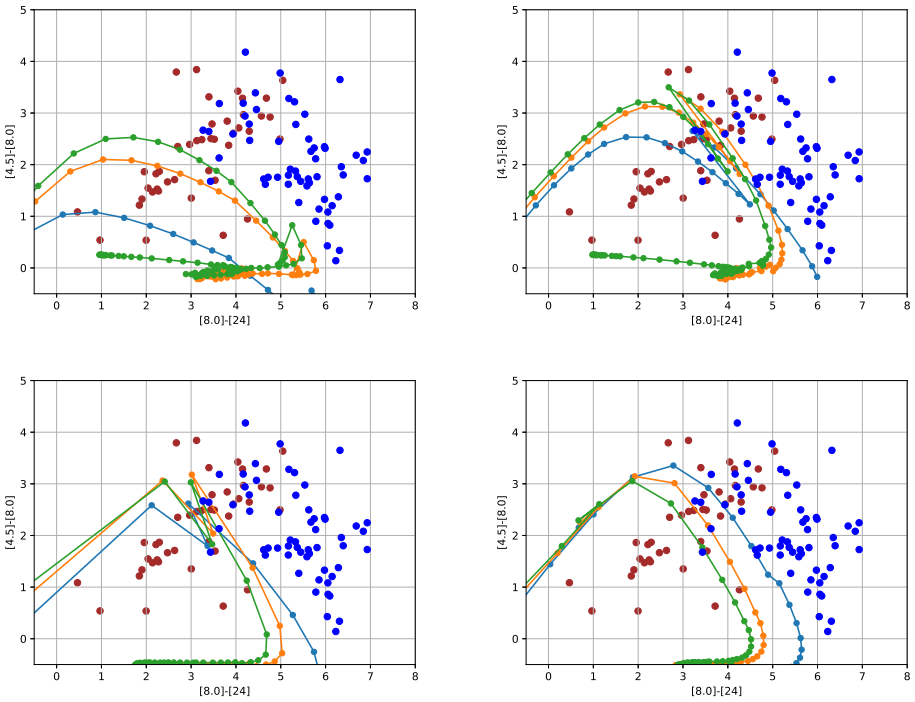

Рис. 1: Порівняння з даними спостережень модельних діаграм колір-колір для ПТ Галактики (два верхні рисунки) та Великої Магелланової Хмари (два нижні рисунки) з урахуванням силікатного (рисунки зліва) та карбонатного (рисунки справа) пилу, з розподілом густини, заданим відповідно до напів-емпіричного закону Головатого–Малькова для значень параметра A=1,0 (блакитні з'єднані точки), 4,0 (помаранчеві з'єднані точки) та 8,0 (зелені з'єднані точки). Точками вказані дані спостережень з праці [22], сині для планетарних туманностей із Молочного шляху, коричневі – з Великої Магелланової Хмари; Моделі планетарних туманностей, представлені на рисунках, побудовані для зір з масою 1,0 $M_{\odot}$

У праці [1] розраховано сітки *газопилових* фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ вздовж еволюційних треків їх ядер та з урахуванням наявності в небулярному середовищі карбонатного та силікатного пилу, з реалістичним розподілом густини речовини [20] в цих оболонках. Там же і здійснено синтетичну фотометрію модельних спектрів у діапазонах довжин хвиль, які відповідають фотометричним фільтрам, що використовувалися на космічних ІЧ-телескопах IRAS та Spitzer, а також в проекті 2MASS, де враховували коефіцієнти пропускання їхніх фотометрів. Отримані в такий спосіб модельні діаграми "колір-колір" у праці [1] порівнювали з відповідними даними спостережень.

Однак, у праці [1] розрахунки сітки здійснювали за допомогою коду *Cloudy v08.00* (версія програми 2008 р.). Ми перерахували цю сітку за допомогою новішої версії програми *Cloudy v17.01* (версія програми 2017р.). Саме результати цих розрахунків використано у цій праці для перевірки коректності визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ діагностичними методами та відповідними виразами від інших авторів, що враховують неспостережувані стадії іонізації.

На Рис. 1 зображені зразки діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні, використані для порівняння відповідності моделей, побудованих для ПТ Галактики та Великої магелланової Хмари, даним ІЧ-фотометрії реальних ПТ, наведених у праці [22]. Бачимо, що значна кількість модельних точок потрапляє в область спостережуваних даних, що свідчить про відповідність нових моделей даним спостережень. Більше діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні можна знайти в архіві за адресою *http://old.physics.lnu.edu.ua/depts/KAF/IR_Mod2019_Obs_Compar.tar.gz*. На них, зазвичай, моделі, побудовані вздовж еволюційних треків ядер ПТ на діаграмах колір-колір потрапляють в область спостережуваних даних. Слід також зауважити, що модельні потоки у смузі 5,8 мкм низькі. Це на діаграмах колір-колір спричиняє систематичний зсув модельних результатів відносно спостережуваних даних. Особливо помітно таке зміщення на діаграмах з [5,8]-[8,0]. Однак, одночасно з цим фактом, діаграми [4,5]-[8,0] (див., напр., рис. 1) не показують помітного систематичного зсуву, що, на наш погляд, свідчить про необхідність перевірки правильності реалізації процедури обробки спостережуваних даних у праці [22], яку ми маємо намір найближчим часом здійснити.

Зазначимо, що в результаті розрахунку сітки моделей світіння оболонок ПТ ми отримуємо також іонний вміст, який розподілений за об'ємом даних об'єктів для різних іонів по-різному. Для перевірки виразів з табл. 1 ми б могли використати усереднені за об'ємом та зважені за електронною концентрацією значення іонного вмісту різних іонів. Однак, іонний вміст зі спектрів реальних ПТ отримується по-іншому, а саме – за допомогою діагностичних методів. Отриманий в такий спосіб іонний вміст може відрізнятися від усередненого модельного. Тому надалі ми визначаємо іонний вміст з модельних спектрів діагностичним (як під час роботи зі спостережуваними спектрами) методом.

4 Діагностика модельних спектрів

Є декілька способів визначення n_e та T_e у ПТ. Деякі з них базують на діагностичних співвідношеннях між інтенсивностями авроральних та небулярних ліній (наприклад, $\lambda 4364$Å$/\lambda\lambda(4959+5007)$Å[O III]), які значно залежать від T_e і слабко – від n_e, інші – навпаки – використовують співвідношення (наприклад, $\lambda 6716$Å$/\lambda 6731$Å[S II]), які значно залежать від n_e і майже не залежать від T_e. Є також так звані калібраційні методи, які використовують кореляції між хімічним вмістом та інтенсивностями сильних (наявних у всіх спостережуваних спектрах) ліній. Кожен із цих методів має свої переваги і недоліки. Однак, найбільш повним, з погляду врахування всіх (або більшості) доступних із спостережень емісійних ліній, вважається метод "перетину кривих" залежностей n_e–T_e, побудованих для різних діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній, які вдалося віднайти у спо-

стережуваному спектрі.

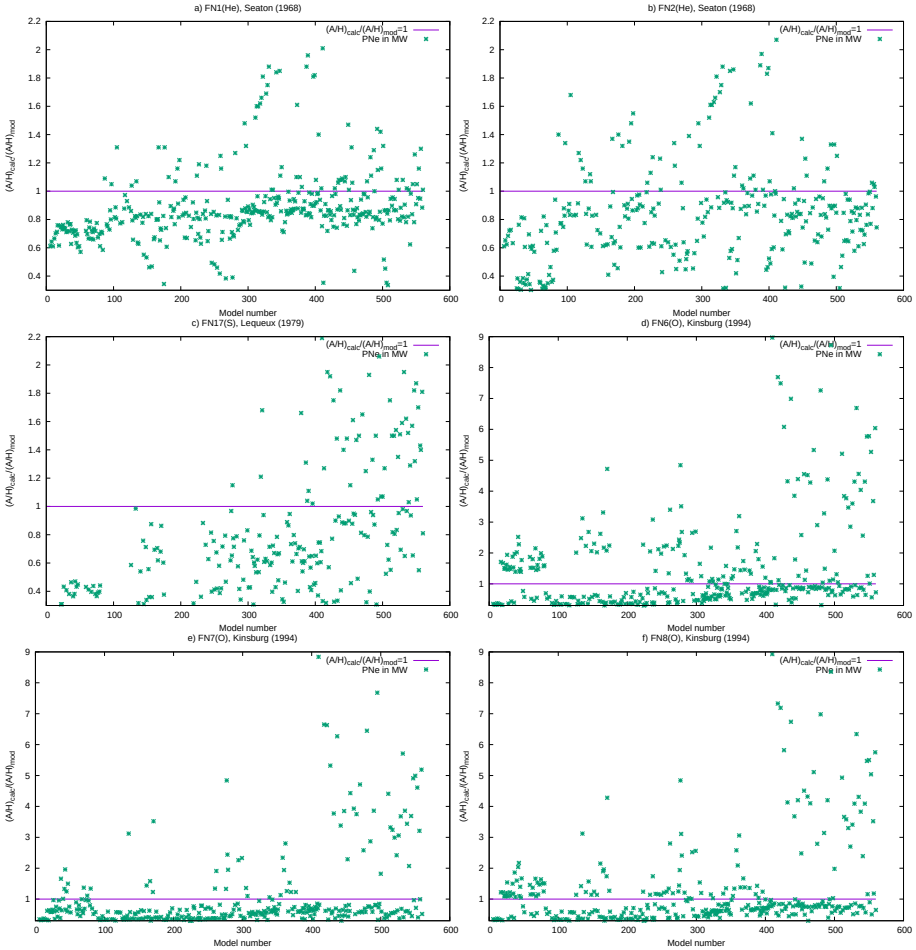

Рис. 2: Результати перевірки відтворюваності виразами 1, 2 (визначення вмісту He), 17 (визначення вмісту N), 6–8 (визначення вмісту O) з табл. 1 хімічного вмісту, заданого в сітці моделей для ПТ Галактики

У праці [2] описано алгоритм розрахунку електронної температури T_e та концентрації n_e сучасним методом "перетину кривих" різних відношень інтенсивностей заборонених, інтеркомбінаційних та рекомбінаційних ліній з подальшим розрахунком іонного A^{+i}/H^+ та хімічного A/H вмісту, використовуючи програму DIAGN. Оскільки елементарні процеси в небулярній плазмі мають жортско не-ЛТР характер, то під час виведення залежностей n_e–T_e заселеність енергетичних рівнів відповідних іонів здійснюється за допомогою розрахунку системи рівнянь статистичної рівноваги. Програма DIAGN [4] дає змогу розрахувати ці заселеності для п'ятирівневого атома/іона. Під час роботи з програмою користувач вибирає значення n_e та T_e з перетину кривих їх залежностей, після цього програма розрахує відносний іонний

вміст різноманітних іонів. Також програма DIAGN може розрахувати повний хімічний вміст для типу ПТ (який є заданим), якщо для них задані відповідні вирази для іонізаційно-корекційних множників.

За допомогою програми DIAGN можна обчислити залежності T_e від n_e для чотирьох зон різного ступеня збудження. Якщо є достатня кількість відносних інтенсивностей відповідних ліній, то програма розрахує n_e та T_e для кожної зони окремо, саме тому так важливо використовувати багаті інтенсивностями лінії.

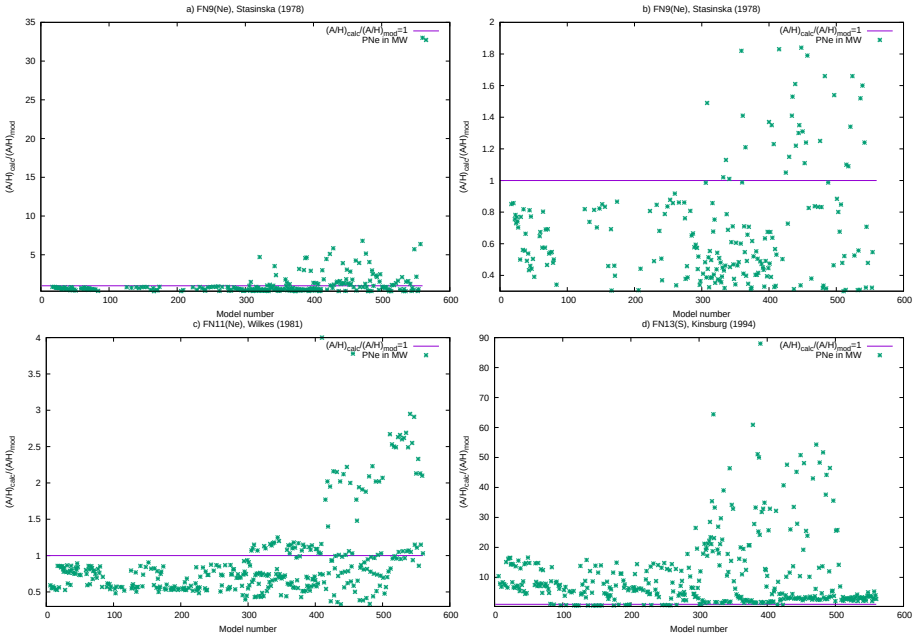

Рис. 3: Результати перевірки відтворюваності виразамт 9, 11 (визначення вмісту Ne), а також 13 (визначення вмісту S) з Табл. 1 хімічного вмісту, заданого в сітці моделей для ПТ Галактики.

Отримавши значення n_e та T_e, програма DIAGN визначає іонний вміст всіх іонів, якщо вони світяться у відповідній зоні іонізації та за умови, що інтенсивність хоча б однієї емісійної лінії даного іона відмінна від нуля.

Методом діагностики світіння небулярних спектрів ми визначили n_e та T_e та усереднений іонний вміст на основі **560** фотоіонізаційних моделей з сітки фотоіонізаційних моделей світіння (СФМС), розрахованої для ПТ Галактики та на основі **2389** моделей ПТ Великої Магелланової Хмари.

5 Перевірка вибірки виразів для визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ

Отриманий діагностичним методом DIAGN іонний вміст використовували для визначення хімічного вмісту за допомогою виразів з табл. 1. Далі значення цього

вмісту були порівняні, шляхом відношення із заданими під час розрахунку СФМС оболонок ПТ. У цій сітці моделей можна виділити дві гілки, що відрізняються усередненим хімічним вмістом:

1. За результатами попередніх визначень хімічного вмісту оболонок ПТ Галактики (висока металічність).

2. За результатами попередніх визначень хімічного вмісту оболонок ПТ Великої Магелланової Хмари (низька металічність).

Результати аналізуватимемо окремо для цих двох металічностей.

У таблицях 2 та 3 наведено результати статистичного аналізу тесту виразів для визначення хімічного вмісту, проведеного на основі сітки фотоіонізаційних моделей світіння для ПТ Галактики (MW) та Великої Магелланової Хмари (BMX, а в англ. абревіатурі – LMC) відповідно. Тут FN – номер формули (такий самий, як у табл. 1), MN – кількість ненульових моделей, задіяних у нашому тестуванні (результати кожної ненульової моделі дали змогу визначити хімічний вміст за допомогою виразу FN), $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$ – усереднені за кількістю MN значення відношень хімічного вмісту відповідного елемента (див. стовпець Елемент), отриманого за допомогою формули FN до значення хімічного вмісту, прийнятого при розрахунку моделей, SD – це стандартне відхилення, яке характеризує розсіювання значень випадкової величини (у нашому випадку – відношення порахованого вмісту до заданого). Також наведено відхилення $\Delta = \left(\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}} - 1\right) \times 100$ (у відсотках) значень $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$ від одиниці (найкращого значення); мінімальні (Min) та максимальні (Max) значення відношень вищезгаданих значень хімічного вмісту у вибірці з моделей, які дали ненульове значення для відповідного виразу FN. З метою оцінки рівномірності розподілу значень для різних моделей відношень порахованого до заданого хімічного вмісту для кожного з виразів FN використовувалися значення процентилів (див. колонки 25%, 50% та 75%). Ці значення дають також змогу виявити систематичні зсуви результатів тестових відношень від одиниці. Результати тестувань у таблиці просортовано у порядку зростання Δ.

Для візуалізації отриманих розкидів значень $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$ за результатами окремих моделей побудовано рисунки 2–3. У даній статті наведено візуалізації лише для тих виразів FN, усереднені значення $\overline{\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}}$ яких за ненульовими моделями, значення $|\Delta|$ для яких не перевищують 30% (у табл. 2 та 3 це вирази, що є над суцільною горизонтальною лінією), а також для тих FN, нижче суцільної лінії у вищеперелічених таблицях, значення SD яких не перевищує одиниці (номери FN таких виразів позначені жирним шрифтом).

5.1 ПТ Галактики

У табл. 2 наведено результати тестування виразів для визначення хімічного вмісту, здійсненого на основі спектрів СФМС для ПТ Галактики (MW). Бачимо, що вирази FN 2, 6–9 та 11 над суцільною прямою (див. рис. 2b, 2d–f, 3a–b) мають відхилення $|\Delta| \leq 30\%$. Однак, як видно зі значень Min та Max для них та особливо з

вищеперелічених рисунків, розкид значень $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$ у них дуже великий (значення Max досягає 33 у випадку FN9 (див. правий верхній кут на рис. 3a).

Табл. 2: Результати тестування виразів для визначення хімічного вмісту, здійсненого на основі спектрів СФМС для ПТ Галактики (MW)

FN	A	MN	$\overline{\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}}$	Δ,%	SD	Min	25%	50%	75%	Max
FN6	O	560	0,93	-7	1,34	8,21e-05	2,48e-02	0,51	1,12	8,97
FN7	O	387	0,93	-7	1,27	1,35e-03	3,53e-01	0,56	0,77	8,84
FN11	Ne	387	0,85	-15	0,57	9,76e-02	5,57e-01	0,74	0,94	4,00
FN8	O	387	1,15	15	1,36	1,00e-02	4,31e-01	0,71	1,19	8,93
FN9	Ne	386	0,82	-18	1,93	9,56e-04	1,90e-01	0,44	0,79	33,0
FN2	He	387	0,70	-30	0,43	4,21e-02	3,50e-01	0,72	0,92	2,07
FN10	Ne	324	0,67	-33	1,54	6,12e-04	1,97e-01	0,37	0,63	17,7
FN5	O	560	0,65	-35	1,14	8,21e-05	1,40e-02	0,37	0,64	8,84
FN1	He	560	0,64	-36	0,45	1,11e-03	9,12e-02	0,78	0,88	2,01
FN3	N	560	1,41	41	3,91	3,28e-05	1,62e-02	0,19	1,09	37,8
FN17	N	387	0,52	-48	0,48	7,30e-03	1,21e-01	0,40	0,75	2,19
FN16	S	560	1,62	62	1,57	2,11e-03	9,73e-02	1,17	2,84	14,3
FN12	Ne	387	1,74	74	3,62	1,25e-02	2,13e-01	0,66	1,33	35,9
FN4	N	560	2,61	161	4,42	4,25e-02	2,66e-01	0,58	2,29	25,1
FN13	S	560	7,36	636	0,11	2,09e-03	9,81e-02	3,17	8,71	88,0
FN15	S+	387	9,17	817	6,29	4,76e+00	5,65e+00	6,69	8,87	37,1
FN14	S	560	0,29	2770	0,70	2,09e-03	9,81e-02	4,07	0,16	487

Щодо рівномірності розкиду з урахуванням можливого систематичного зсуву, то за результатами аналізу процентилів вираз FN11 (для визначення неону, див. рис. 3c) показує добрий результат (для 50% маємо величину 0,74), по зсуву вгору на ≈26% тих значень, які дає вираз FN11, або ж, якщо вирішити проблему викидів вниз, після зсуву вгору на ≈6%. З рис. 3d видно, що зі збільшенням номера моделі (маси зорі-попередника ПТ) значення $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$ різко збільшуються. Так цей вираз добре працює для немасивних зір-попередниць ПТ. Відносно добрі результати також показали вирази 2 (визначення гелію) та 8 (визначення оксиґену), якщо, звичайно, враховувати систематичний зсув. Однак викиди вниз (див. значення у колонці Min) свідчать про небезпеку їх застосування.

Ми також звертаємо увагу на вирази, які розташувалися нижче суцільної лінії, але мають значення SD $\leq$ 2 FN1 (рис. 2a), FN17 (рис. 2c) та FN13 (Рис. 3d). Вони потребують великих систематичних зміщень до одиниці результатів розрахунку за допомогою відповідних формул, але є рекомендовані для подальшого використання після такої корекції.

5.2 ПТ Великої Магелланової Хмари

У табл. 3 наведено результати тестування виразів для визначення хімічного вмісту, здійсненого на основі спектрів СФМС для ПТ Великої Магелланової Хмари (LMC). Бачимо, що вирази над суцільною прямою у цій таблиці, а саме FN1–FN3

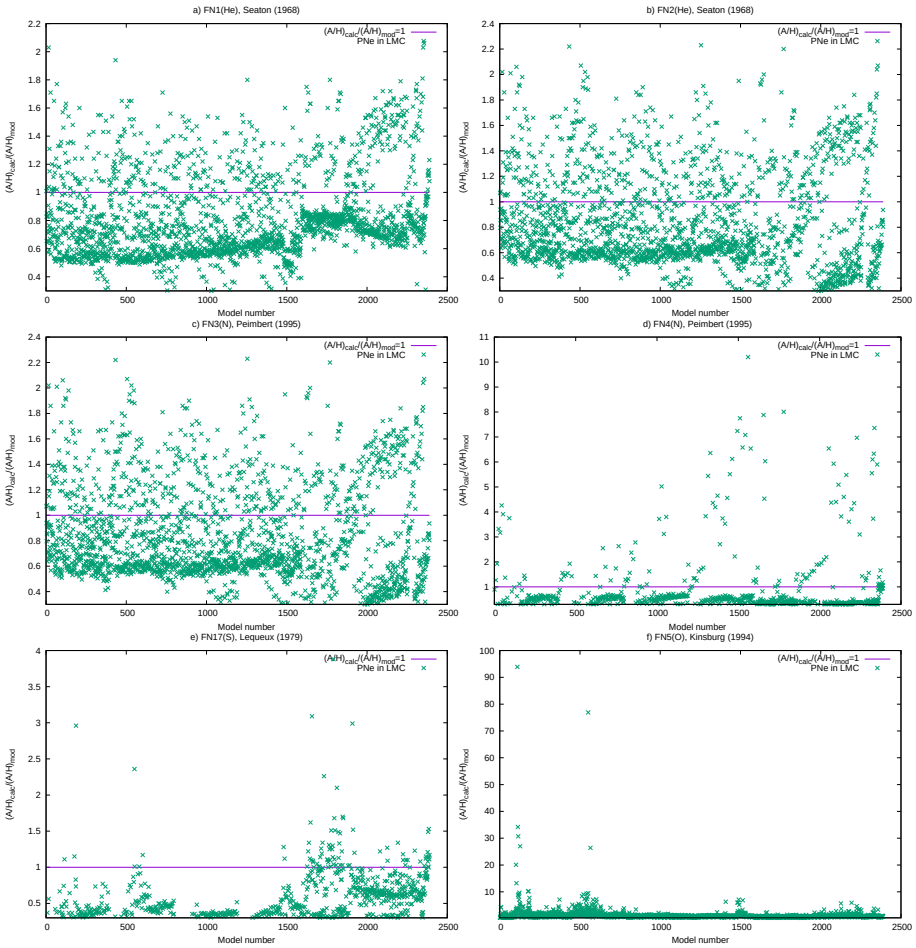

Рис. 4: Результати перевірки відтворюваності виразами FN1 та FN2 (визначень вмісту He), FN3, FN4 та FN17 (визначення вмісту N), а також виразу FN5 з Табл. 1 хімічного вмісту, заданого в СФМС для ПТ ВМХ

(рис. 4a–c), FN5 (рис. 4f), FN9 та 10 (рис. 5a–d) мають відхилення $|\Delta| \leq 30\%$. Однак, як видно з значень Min та Max для них, розкид $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$ у них ще більший, ніж у випадку ПТ Галактики. Наприклад, значення Max досягає 357 у випадку FN3 (на рис. 4c цей викид не показаний). Щодо рівномірності розкиду з урахуванням можливого систематичного зсуву, то за результатами аналізу процентилів вирази FN1 та FN2 (для визначення вмісту гелію) показують відносно добрий результат (для 50% маємо величину близьку до 0,7: вимагає 30% зсуву вгору тих значень, які дають вирази 1 та 2, а якщо вирішити проблему викидів вниз значень тестових відношень, то досить буде зсуву вниз на ≈3% для FN2 та ≈9% вверх – для виразу FN1).

Також звертаємо увагу на вирази, які розташувалися нижче суцільної лінії, але мають значення SD $\leq$ 2: FN12 (рис. 5e), FN4 (рис. 4d) та FN17 (рис. 4e). Вони

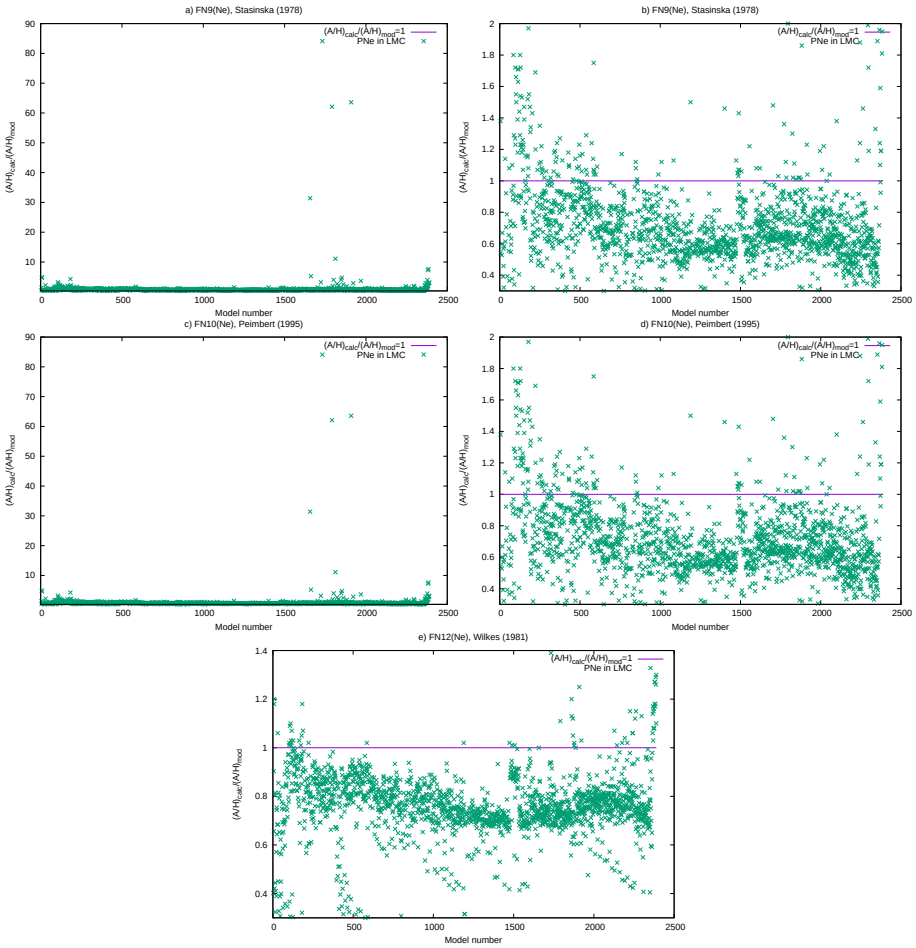

Рис. 5: Результати перевірки відтворюваності виразом 9, 10 та 12 (визначення вмісту Ne) з табл. 1 хімічного вмісту, заданого в СФМС для ПТ ВМХ

потребують великих систематичних зміщень до одиниці результатів розрахунку за допомогою відповідних формул, але є рекомендовані для подальшої аналізу з метою корекції.

6 Висновки

Під час виконання цієї праці ми перевірили наскільки коректним є застосування діагностичного методу у поєднанні з вибіркою популярних серед астрофізиків виразів для визначення хімічного вмісту в оболонках планетарних туманностей. Для вирішення цього завдання ми використали розраховану попередньо сітку фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ за методикою, описаною у праці [1]. Це – газопилові моделі, які розраховано на основі найновіших атомних даних та за

Табл. 3: Результати статистичного аналізу тесту виразів для визначення хімічного вмісту, проведеного на основі сітки фотоіонізаційних моделей світіння для ПТ BMX (LMC)

FN	A	MN	$\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$	$\Delta, \%$	SD	Min	25%	50%	75%	Max
FN9	Ne	2229	1.18	18	2.68	1.69e-02	0.49	0.80	1.45	104
FN3	N	2389	0.12	20	10.8	4.90e-05	0.03	0.07	0.30	357
FN2	He	2229	0.79	-21	0.41	6.80e-02	0.56	0.68	1.03	2.23
FN1	He	2389	0.77	-23	0.35	1.81e-03	0.58	0.72	0.91	2.06
FN5	O	2388	1.29	29	2.95	5.87e-04	0.07	0.92	1.30	93.9
1FN0	Ne	2228	0.70	-30	2.71	3.14e-04	0.32	0.61	0.77	84.1
FN12	Ne	2229	0.65	-35	0.27	6.73e-02	0.61	0.74	0.81	1.39
FN7	O	2229	1.36	36	2.99	8.40e-02	0.72	0.95	1.35	93.9
FN8	O	2229	1.51	51	3.00	1.34e-01	0.83	1.08	1.59	94.3
FN6	O	2389	1.56	56	3.01	5.87e-04	0.78	1.08	1.80	94.4
FN4	N	2389	0.38	-62	0.79	7.87e-03	0.12	0.20	0.34	10.2
FN17	N	2229	0.31	-69	0.30	2.80e-02	0.14	0.20	0.37	3.88
FN11	Ne	1924	2.15	115	18.7	2.42e-02	0.54	0.74	1.20	650
FN16	S	2389	4.28	328	6.28	8.08e-03	1.54	3.70	5.28e	214
FN15	S+	2229	7.25	625	3.22	4.76e+00	5.53	6.28	7.31	33.8
FN13	S	2389	1.39	1290	15.4	8.03e-03	2.92	11.6	17.6	221
FN14	S	2389	0.22	2120	48.0	8.03e-03	3.20	13.0	0.21	1230

допомогою одного з останніх релізів (v17.01) програми *Cloudy* [21]. Необхідність використання моделей зумовлене тим, що ми, апріорі, знаємо значення вмісту різних хімічних елементів, які є вхідними параметрами для будь-якої фотоіонізаційної моделі. Саме порівняння з цими значеннями вмісту хімічних елементів, отриманих за допомогою вибірки згаданих виразів (див. табл. 1), і дає нам результат перевірки: чим краще вираз відтворює заданий в моделях вміст – тим він кращий.

Далі модельні інтегральні спектри цієї сітки були проаналізовані методом DIAGN для діагностики небулярних спектрів, який, по суті, є однією з реалізацій методу перетину кривих n_e та T_e для різних діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній. Так, модельні спектри аналізували за допомогою того самого методу, який використовується для діагностики спостережуваних спектрів реальних ПТ. Діагностика дала нам змогу визначити усереднений іонний вміст, який був використаний для визначення хімічного вмісту за допомогою виразів з табл. 1. Цей вміст був порівняний шляхом відношення з заданим у моделях.

Очевидно, що різні моделі дали різне тестове відношення між розрахованим та заданим у моделях значенням вмісту відповідного хімічного елемента для кожного з виразів вищезгаданої вибірки. Ми знайшли середні значення окремо для двох частин СФМС, які розраховували для ПТ Галактики та ВМХ, відповідно. Було також оцінено розкид значень та проаналізовано можливість систематичної корекції результатів найкращих виразів з метою точнішого відтворення вмісту, заданого в моделях.

Так були вибрані 9 виразів, які можна використати для подальшого покращення з метою визначення з їх допомогою хімічного вмісту в ПТ Галактики та 9 – у ПТ ВМХ, відповідно. Серед цих 18-ти виразів тільки чотири (FN: 1, 2, 9 та 17) можна використовувати для визначення хімічного вмісту (після їх вдосконалення, звичайно) в ПТ як Галактики, так і ВМХ.

На завершення зазначимо, що визначення хімічного вмісту діагностичними методами з подальшим застосуванням виразів, які містять в собі корекцію за неспостережувані стадії іонізації, сильно залежить від результатів фотоіонізаційного моделювання та/або припущень, на основі яких вони були отримані. Тому, найбільш коректним виглядає підхід виведення нових виразів для іонізаційно-корекційних виразів після кожного покращення результатів ФМС оболонок ПТ, основним критерієм якого є краще відтворення модельними результатами даних спектральних та фотометричних спостережень цих об'єктів.

Подяки. Автори висловлюють подяку доц. кафедри астрофізики Смеречинському С.В. за допомогу у розробці python-скрипта для статистичної обробки результатів. Виконання цієї роботи частково фінансувалося з коштів фундаментальної науково-дослідної теми № 0118U003607 МОН України.

Список використаної літератури

1. Мелех Б. Визначення хімічного вмісту газопилових оболонок планетарних туманностей / Б. Мелех // Вісник Львівського ун-ту. Серія фізична. – 2015. – Вип. 50. – С. 125.
2. Головатий В.В. Фізика світіння газових туманностей. Навчальний посібник / В.В. Головатий, Б.Я. Мелех, Н.В. Гаврилова. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2013. – 128 с.
3. Osterbrock D.E. Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. Second Edition / D.E. Osterbrock, G.J. Ferland. – Saulito, California : University Science Book, 2005. – 496 p. ISBN 1-891389-34-3.
4. Головатий В.В. Количественный анализ ультрафиолетовых, оптических и инфракрасных эмиссионных спектров небесных тел с целью определения физических параметров и химического состава излучающего диффузного вещества и межзвездного поглощения до него / В.В. Головатий, Р.Е. Гершберг, Ю.Ф. Мальков, В.И. Проник // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. – 1999. – Т. 96. – С 72.
5. Seaton M. The Excitation of Spectrum Lines in Nebulae by Resonant Scattering of Radiation from the Central Stars / M. Seaton // MNRAS. – 1968. – Vol. 139, № 129. – P. 129. doi:10.1093/mnras/139.2.129.
6. Leisy P. Planetary nebulae in the Magellanic Clouds. I. Carbon abundances and TypeI PNe / P. Leisy, M. Donnefeld // Astron. Astrophys. Suppl. – 1996. – Vol. 116. – P. 95.
7. Stasinska G. Empirical methods for determining elemental abundances tested on model H II regions / G. Stasinska // Astron. and Astrophys. – 1978. – Vol. 66. – P. 257.
8. Lequeux J. Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies / J. Lequeux, M. Peimbert, J.F. Rayo [et al.] // Astron. and Astrophys. – 1979. – Vol. 80. – P 155.
9. Stasinska G. Some comments on the analysis of extragalactic H II regions spectra / G. Stasinska // Astron. and Astrophys. – 1980. – Vol. 84, № 3. – P. 320.
10. Stasinska G. A catalogue of model HII regions / G. Stasinska // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. – 1982. – Vol. 48. – P. 299.

11. Wilkes B. On nitrogen abundances of planetary nebulae / B. Wilkes, G. Ferland, D. Hanest, J. Truran // MNRAS. – 1981. – Vol. 197. – P. 1. doi:10.1093/mnras/197.1.1.
12. Kinsburg R.L. Elemental abundances for a sample of southern galctic planetary nebulae / R.L. Kinsburg, M.J. Barlow // MNRAS. – 1994. – Vol. 271. – P. 257. doi:10.1093/mnras/271.2.257.
13. Peimbert M. Temperature fluctuations and the chemical composition of planetary nebulae of Type I / M. Peimbert, V. Luridiana, S. Torres-Peimbert // Rev. Mex. Astr. Astrof. – 1995. – Vol. 31. – P. 147.
14. Barker T. The ionization structure of planetary nebulae. III. NGC 7009 / T. Barker // Astropys. Journ. – 1983. – Vol. 267. – P. 630. doi:10.1086/160899.
15. Thuan T.X. Heavy Element Abundances in a New Sample of Low-Metallicity Blue Compact Galaxies / T.X. Thuan, Y.I. Izotov, V.A. Lipovetsky // Astropys. Journ. – 1995. – Vol. 445. – P. 108. doi:10.1086/175676.
16. Peimbert M. Chemical Abundances in Galactic HII Regions / M. Peimbert, R. Costero // Bol. Obs. Ton. Tacubaga. – 1969. – Vol. 5. – P. 3.
17. Holovatyy V.V. Chemical composition of planetary nebulae in the Large and Small Magellanic Clouds / V.V. Holovatyy, B.Ya. Melekh, M.M. Sokil, N.V. Havrylova // Astronomy Reports. – 2013. – Vol. 57. – P. 366. doi:10.1134/S1063772913050041.
18. Головатый В.В. Химический состав галактических планетарных туманностей с учетом неоднородностей плотности газа в их оболочках / В.В. Головатый, Н.В. Гаврилова // Астрономический журнал. – 2005. – Т 82, № 5. – С. 437.
19. Мелех Б.Я. Фотойонізаційне моделювання оболонок планетарних туманностей з урахуванням пилу. І. Вплив пилу на емісійний спектр планетарних туманностей / Б.Я. Мелех, А.Р. Кузьмак // Журнал фізичних досліджень. – 2012. – Т. 16, № 1-2. – С. 1902-1.
20. Головатый В.В. Эволюция планетарных туманностей: эмпирический подход / В.В. Головатый, Ю.Ф. Мальков // Астрон. журн. – 1992. – Т 69. – С. 1166.
21. Ferland Hazy G.J. A Brief Introduction to Cloudy / Ferland Hazy G.J. // University of Kentucky : Physics Department Internal Report ; 2008. – Available from: http://www.nublado.org.
22. Karska A. Comparison of infrared spectra of Planetary Nebulae in Milky Way and Large Magellanic Cloud : Master thesis / Karska A. – Nicolaus Copernicus University. – Torun, 2009. – 118 p.

References

1. B.Y. Melekh, Visnyk Lviv Univ. Ser. Phys. **50**, 125 (2015).
2. V.V. Holovatyy, *Fizyka svitinnya gazovykh tumannostey. Navchalnyy posibnyk* (Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2013), 128 p.
3. D.E. Osterbrock, G.J. Ferland, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. Second Edition* (Saulito, California: University Science Book, ISBN 1-891389-34-3, 2005), 496 p.
4. V.V. Golovatyy, R.E. Gershberg, Yu.F. Malkov, V.Y. Pronyk, Yzv. Krym. astrofyz. observatoryy. **96**, 72 (1999).
5. M. Seaton, MNRAS. **139**, 129 (1968). doi:10.1093/mnras/139.2.129.
6. P. Leisy, M. Donnefeld, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **116**, 95 (1996).
7. G. Stasinska, Astron. and Astrophys. **66**, 257 (1978).
8. J. Lequeux, M. Peimbert, J.F. Rayo, A Serrano, S. Torres-Peimbert, Astron. and Astrophys. **80**, 155 (1979).
9. G. Stasinska, Astron. and Astrophys. **84**, 320 (1980).
10. G. Stasinska, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **48**, 299 (1982).
11. B. Wilkes, G. Ferland, D. Hanest, J. Truran, MNRAS. **197**, 1 (1981) doi:10.1093/mnras/197.1.1.
12. R.L. Kinsburg, M.J. Barlow, MNRAS. **271**, 257 (1994). doi:10.1093/mnras/271.2.257.
13. M. Peimbert, V. Luridiana, S. Torres-Peimbert, Rev. Mex. Astr. Astrof. **31**, 147 (1995).
14. T. Barker, Astropys. Journ. **267**, 630 (1983). doi:10.1086/160899.
15. T.X. Thuan, Y.I. Izotov, V.A. Lipovetsky, Astropys. Journ. **445**, 108 (1995). doi:10.1086/175676.
16. M. Peimbert, R. Costero, Bol. Obs. Ton. Tacubaga. **5**, 3 (1969).
17. V.V. Holovatyy, B.Ya. Melekh, M.M. Sokil, N.V. Havrylova, Astronomy Reports. **57**, 366 (2013). doi:10.1134/S1063772913050041.
18. V.V. Holovatyy, N.V. Havrylova, Astronomy Reports. **82**, 437 (2005).
19. Y. Melekh, A. Kuzmak, J. of Phys. Stud. **16**, 1902 (2012).
20. V.V. Holovatyy, Yu.F. Malkov, Astronomy Reports. **69**, 1166 (1992).
21. G.J. Ferland Hazy, A Brief Introduction to Cloudy (University of Kentucky: Physics Department Internal Report, 2008), http://www.nublado.org.
22. A. Karska, Master thesis, Nicolaus Copernicus University, 2009.

Checking of the reliability of the chemical compositions determination in planetary nebulae using diagnostic methods in combination with popular ionization-correction factors

B. Melekh, O. Khmilevska, M. Kasheba

Ivan Franko National University of Lviv,
Astrophysics Department,
8 Kyrylo and Methody Str., 79005 Lviv, Ukraine,
e-mail: bmelekh@gmail.com

The reliability of the chemical compositions determination in planetary nebulae (PNe) envelopes using sample of popular expressions in combination with diagnostic methods to determine the ionic abundances on the base of diagnostic ratios between emission line intensities in spectra of these objects was checked. For this purpose the emission-line spectra from modern grid of photoionization models of PNe were used. This grid was calculated along the evolutionary tracks of their nuclei, with realistic radial density distribution in nebular envelope. We used the evolutionary tracks for stars with masses which are close to Solar one ($0.95M_{\odot}$, $1.00M_{\odot}$, $1.5M_{\odot}$), because most of stars-predecessors of these nebulae have mass within this range. The correspondence of modelling results to observational data was checked using comparison of synthetic color-color diagrams in IR (calculated in models) with observed ones. Grid of photoionization models for PNe from Milky Way and Large Magellanic Cloud was calculated with averaged abundances of chemical elements in PNe of these galaxies. The presence in PNe of silicate and carbonate dust grains was also taken into account. Photoionisation modelling allow us to obtain the synthetic emission line spectra which are much more richer than observed ones. In present work the diagnonostic of these spectra was performed using curves crossing method for n_e - T_e dependences. The resulting ionic abundances were used to determine the chemical abundances using sample of popular expressions from various authors. Obtained in such way chemical abundances were compared with corresponding ones assumed during photoionization modelling. The detailed analysis of applicability of various expressions for determining of the chemical abundances in PNe was done. It was demonstrated the necessity of derivation of the new expressions for chemical abundances determination in envelopes of PNe using calculation results of mentioned above grid of photoionization models.

Key words: planetary nebulae, dust grains, photoionization modelling, chemical composition

Статтю отримано: 10.06.2019
Прийнято до друку: 25.06.2019